The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導に関する研究
Author(s)	角田, 祐輔
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/82223
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　角田　祐輔　）	
論文題名	「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導に関する研究

論文内容の要旨

本研究の最終目標は，未知環境を適応的に振る舞う群ロボットシステムの制御系設計論を構築することである．従来の制御方式では，ロボットはカメラ等で環境情報を取得し，それをもとに目的地までの移動経路を設計・追従する．しかし，時々刻々と予測不可能に変化する環境全ての情報を取得することは因果律に反するため不可能であり，また，環境情報を正確に取得するために高性能のCPUとセンサ群を搭載する方式は，総コストが莫大になりシステム設計が困難になる恐れがある．一方で，生物たちは環境との相互作用を巧みに利用しながら自然環境をしなやかにかつタフに生き抜いている．このことから筆者は，ロボット群が未知環境を適応的に振る舞うために必要な要素は，ロボットと環境との相互作用であると確信し，ロボット群自体が自律的に周囲環境を改変し，環境との相互作用を自身の制御に積極的に活かすアプローチを採用する．本研究では，ロボット群が所望の状態に誘導されるように環境に対して付与される空間を「場」と呼称し，「場」をロボット群自体が創成・制御することでシステム全体が自然と誘導されるような群ロボットシステムの制御系設計論を構築することを目的とする．その第一歩として，本博士論文では，ロボット群をある目的地へ誘導する制御問題に対して，ロボット群が創る「場」と，ロボット群の制御則とが巧みにマリアージュされ，システム全体が自然に誘導されるような制御を「「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導」と呼称し，その具体的な設計法の提案と，解析・実機実験の両面からその妥当性を示した．

まず，提案する制御方式の妥当性を検証するための基礎研究として，複数台のロボットが「場」を創る位置にあらかじめ固定されており，それらが「場」を創出・制御することで1台の移動ロボットを目的地へ誘導する実機実験に取り組んだ．本研究では，「場」を創る物理量として可聴領域音を採用し，スピーカ音の強さの勾配を「音場」として利用した．音場が時空間的に静的な場合と，動的に制御される場合の2つの制御法に対して，マイクを搭載する2種類の移動ロボットのコントローラを設計し，誘導実験を行った．その結果，「場」の創成・制御法と移動ロボットの設計法には自由度があり，それらの相互作用を状況に応じて適切に設計することが重要であることがわかった．

次に，上記実験で得られた知見をもとに，複数台の移動ロボットが「場」を創成・制御することで誘導される群システムの設計に取り組んだ．本論文では，陽的な「場」を創る少数のコントローラを用いて，いかに多数のエージェントを誘導するかという問題を扱う．この問題に対して，機動制御法と呼ばれる誘導制御法を採用する．この制御法は，牧羊犬のヒツジ追い現象のように，機動性を有する少数のコントローラ(牧羊犬)が，コントローラから逃げ，群れ同士で集まる多数のエージェント(ヒツジ群)の周囲を走り回り，群れの局所部に刺激を与えることで群れ全体を間接的に誘導する方法である．筆者はこの制御法において，分散度の異なるヒツジ群に対して牧羊犬が群れのどの部分に刺激を与え誘導すれば良いのかを明らかにすることを目的とした．本研究ではまず，1体の牧羊犬が1体のヒツジを誘導する制御問題に対して，ヒツジのモデルと牧羊犬の機動制御則の設計を行い，システムの安定性解析を行った．結果，誘導が収束するゲインの条件を導出し，所望の収束状態へ誘導させるための機動制御則の設計法を提示した．次に，複数のヒツジの誘導ではこの結果を拡張し，ヒツジ群を「重心にいる1体のヒツジ」とみなし，牧羊犬がヒツジ群の重心を追跡し誘導する機動制御則を構築した．これにより，ヒツジ群の重心を所望の収束状態へ誘導することが可能であることを数値シミュレーションと実機検証により示した．最後に，分散度の高いヒツジ群の誘導を考え，シミュレーションによる誘導性能の検証を行った．上記で述べた，牧羊犬が群れの重心を追跡する中心追跡制御法に加えて，目的地から最も離れたヒツジを追跡する最遠個体追跡制御法を新たに考案し，それら2つと先行研究の方法を含めた3つの制御法に対してシミュレーションを行い，誘導成功率と誘導時間を比較した．結果，最遠個体追跡制御が最も有効であることがわかった．加えて，ヒツジに大きさを仮定し，ヒツジ同士の重なり合いにより牧羊犬が手前のヒツジしか認識できない場合に誘導を行っても，最遠個体追跡制御が最も効率よく誘導できることがわかった．結果，分散度の高いヒツジ群を誘導する場合は，群れの外側を刺激することで自然と群全体を誘導することが可能であることを示した．総じてこれらの研究結果から，制御対象であるヒツジ群の創る「場」の特性(群れの分散度)と，群れを誘導するために必要な牧羊犬の創る「場」の機動性と，群れへの適切なアプローチ点との関係を明らかにした．

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　角　田　祐　輔　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教 授	大須賀　公一
	副 査　教 授	石川　将人
	副 査　教 授	東森　充

論文審査の結果の要旨

本論文では，未知環境を適応的に振る舞う群ロボットシステムの制御系設計法を提案し，その有効性を理論解析，シミュレーションおよび実験によって検証している．

従来の制御方式では，ロボットはカメラ等で環境情報を取得し，それをもとに目的地までの移動経路を設計・追従する．しかし，時々刻々と予測不可能に変化する環境全ての情報を取得することは因果律に反するため不可能であり，また，環境情報を正確に取得するために高性能の CPU とセンサ群を搭載する方式は，総コストが莫大になりシステム設計が困難になる恐れがある．一方で，生物たちは環境との相互作用を巧みに利用しながら自然環境をしなやかにかつタフに生き抜いている．

それに対して本研究では，ロボット群が未知環境を適応的に振る舞うために必要な要素は，ロボットと環境との相互作用であると想定し，ロボット群自体が自律的に周囲環境を改変し，環境との相互作用を自身の制御に積極的に活かすアプローチを提案している．具体的には，ロボット群が所望の状態に誘導されるように環境に対して付与される空間を「場」と呼称し，「場」をロボット群自体が創成・制御することでシステム全体が自然と誘導されるような群ロボットシステムの制御系設計論を構築しようとしている．

その第一歩として，本論文では，ロボット群をある目的地へ誘導する制御問題に対して，ロボット群が創る「場」と，ロボット群の制御則とが巧みにマリアージュされ，システム全体が自然に誘導されるような制御を「「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導」と呼称し，その具体的な設計法の提案と，解析・実機実験の両面からその妥当性を示している．以下，本論文の内容である．

第 2 章では，本論文で提示する「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導の枠組みについて述べている．まず，自然界に見られる群れをなす生き物の適応的振る舞いについて列挙し，それらに多く見られる自律分散制御の重要性について述べている．次に，その自律分散制御に基づく群ロボットシステムの研究例について示し，その制御構造と問題点を明示している．次にそれに対して，本論文で注目している「場」の制御に基づくロボット群の制御システムについてその概要と過去の研究事例を紹介している．最後に，この制御に大須賀らが提案している陰陽制御の概念を取り入れた「場」の制御に基づくエージェント群の陰的誘導の枠組みを述べている．

第 3 章では，提案する制御方式の妥当性を検証するための基礎研究として，複数台のロボットが「場」を創る位置にあらかじめ固定されており，それらが「場」を創出・制御することで 1 台の移動ロボットを目的地へ誘導する実機実験に取り組んでいる．特に本研究では，「場」を創る物理量として可聴領域音を採用し，スピーカ音の強さの勾配を「音場」として利用している．音場が時空間的に静的な場合と，動的に制御される場合の 2 つの制御法に対して，マイクを搭載する 2 種類の移動ロボットのコントローラを設計し，誘導実験を行っている．その結果，提案する制御方式は有効であり，「場」の創成・制御法と移動ロボットの設計法には自由度があることや，それらの相互作用を状況に応じて適切に設計することが重要であることが示されている．

第 4 章では，第 5-7 章で扱う牧羊犬のヒツジ追い現象に着想を得たエージェント群の陰的誘導の概要について述べ

ている．第 3 章で得られた知見をもとに，次は複数台の移動ロボットが自律的に「場」を創成・制御することでシステム全体が誘導される群システムの設計に取り組んでいる．本論文では，陽的な「場」を創る少数のコントローラを用いて，いかに多数のエージェントを誘導するかという問題を扱い，この問題に対して機動制御法と呼ばれる誘導制御法を採用している．シープドッグシステムに関する先行研究では，モデリングおよび数値シミュレーションによる誘導性能の検証がほとんどであり，誘導必要な牧羊犬の機動性や，群れへの適切な刺激箇所に焦点を当てて研究するものは少なかった．そこで本論文では，分散度の異なるヒツジ群に対して，牧羊犬が群れのどの部分に刺激を与え誘導すれば効率的な誘導が可能かを明らかにすることを目的とし，ヒツジと牧羊犬の機動制御則のモデリング，および解析・実機検証を通じてその妥当性を検証している．

第 5 章ではまず，1 体の牧羊犬が 1 体のヒツジを誘導する制御問題に対して，ヒツジのモデルと牧羊犬の機動制御則の設計を行い，システムの安定性解析を行っている．結果，誘導が収束するゲインの条件を導出し，所望の収束状態へ誘導させるための機動制御則の設計法を提示している．この結果は，ヒツジを収束させるために必要な牧羊犬の機動性を数理的に示したといえる．

第 6 章では，第 5 章で扱った 1 体のヒツジの機動制御則設計法を拡張することで複数のヒツジの誘導における牧羊犬の機動制御則の設計に取り組んでいる．ヒツジ群を「重心にいる 1 体のヒツジ」とみなし，牧羊犬がヒツジ群の重心を追跡し誘導する機動制御則を構築している．これにより，ヒツジ群の重心を所望の収束状態へ誘導することが可能であることを数値シミュレーションと実機検証により示している．

第 7 章では，分散度の高いヒツジ群の誘導を考え，シミュレーションによる誘導性能の検証を行っている．上記で述べた，牧羊犬が群れの重心を追跡する中心追跡制御法に加えて，目的地から最も離れたヒツジを追跡する最遠個体追跡制御法を新たに考案し，それら 2 つと先行研究の方法を含めた 3 つの制御法に対してシミュレーションを行い，誘導成功率と誘導時間を比較している．その結果，最遠個体追跡制御が最も有効であることが示されている．加えて，ヒツジに大きさを仮定し，ヒツジ同士の重なり合いにより牧羊犬が手前のヒツジしか認識できない場合に誘導を行っても，最遠個体追跡制御が最も効率よく誘導できることを明確にしている．

第 5-7 章の結果から，機動制御法によるエージェント群の陰的誘導において，複数のエージェントが創り出す誘導に対し陰的な「場」の特性(ここではエージェント群の分散度)と，我々が陽的に設計可能な「場」を創るコントローラエージェント(牧羊犬)の機動性と，群れのどこへ刺激を与えるかという適応性とのバランスを明らかにしたといえる．

以上のように、本論文は，陽的に設計・制御する「場」の機能性は，被制御対象であるエージェント群に与える特性に応じて変化すべきであり，それらのバランスを巧みに設計することで，シンプルな制御によるエージェント群の適応的な誘導を実現できることを主張し，それを理論・シミュレーション・実験を通して実証しており，当該分野において学術的に重要な意味を持つ．よって本論文は博士論文として価値あるものと認める．